Journal of Agricultural Machinery
Vol. 8, No. 2, Fall - Winter 2018, p. 309-320

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۸، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۷، ص ۳۲۰-۳۰۹

تخمین گرانروی شیره خرما با استفاده از ماشین بینایی و شبکه عصبی مصنوعی

عبدالعباس جعفری[۱*] - احسان تاتار[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۱

چکیده

تولید صنعتی شیره خرما شامل مراحل مختلفی است که در طی آن نیاز به اندازه‌گیری پیوسته میزان گرانروی در طی مراحل مختلف فرآوری نیاز می‌باشد. روش‌های اندازه‌گیری گرانروی متداول نیازمند نمونه‌گیری از فرآورده بوده و در عین حال زمان‌بر می‌باشند و لذا از این روش‌ها نمی‌توان در کنترل سیستم فرآوری استفاده کرد. به همین دلیل روشی که بتواند به‌صورت بلادرنگ وضعیت گرانروی مایع را پایش نماید، از ملزومات یک سیستم کنترل کیفیت محصول شیره خرما می‌باشد تا مطابق با مقدار آنی گرانروی، اقدام به تغییر پارامترهای ورودی و شرایط فرآوری نماید تا محصولی با گرانروی و کیفیت استاندارد فراهم شود. در این تحقیق بر اساس ویژگی‌های مستخرج از تصاویر و بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی مصنوعی روشی ابداع گردید تا گرانروی شیره خرما را در حین ریزش تعیین نماید. بر اساس اندازه‌گیری‌های به‌دست آمده توسط دستگاه لزجت‌سنج بروکفیلد مشخص شد که رفتار شیره خرما در دماها و غلظت‌های مختلف متفاوت بوده و دامنه گسترده‌ای از رفتار نیوتنی تا غیرنیوتنی را شامل می‌شود. از شبکه عصبی چند لایه با روش تعلیم پس‌انتشار خطا به‌منظور پیش‌بینی دو مقدار شاخص رفتار جریان و شاخص قوام بر اساس ویژگی‌های استخراج شده از تصویر استفاده شد. مقادیر خروجی روش پیشنهادی با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه لزجت‌سنج بروکفیلد در سطوح مختلف دما و غلظت شیره خرما واسنجی گردید. نتایج حاصله بیانگر همبستگی شاخص‌های رفتار و جریان به‌دست آمده از این روش با مقادیر واقعی با ضریب همبستگی تا حد ۰/۹۸۹ و میانگین خطای ۰/۰۱۳۸ در داده‌های ارزیابی بود.

واژه‌های کلیدی: بلادرنگ، پردازش تصاویر دیجیتال، تشخیص الگو، لزجت

مقدمه

فرآورده‌های خرما به دو دسته فرآورده‌های تخمیری و غیرتخمیری تقسیم می‌شوند. از فرآورده‌های تخمیری اتانول، سرکه، اسید سیتریک، تولید پروتئین تک‌یاخته و تولید چربی و از فرآورده‌های غیرتخمیری شیره خرما و قند خرما را می‌توان نام برد. شیره خرما متداول‌ترین فرآورده مشتق از خرما می‌باشد که هم به‌صورت سنتی و هم صنعتی تولید می‌شود (Sabati, 2008).

فرآیند تولید شیره خرما در مقیاس صنعتی و تولید انبوه از چهار مرحله اصلی به شرح زیر تشکیل یافته است: مرحله شستشو و ضدعفونی و هسته‌گیری خرما، مرحله عصاره‌گیری، تصفیه شیره و در نهایت تغلیظ شیره. در روش صنعتی برای تهیه شیره خرما از تجهیزات صنعتی استفاده می‌شود. اما برای انتخاب تجهیزات مناسب دانستن خصوصیات رئولوژیک شیره خرما ضرورت دارد. یکی از این خصوصیات گرانروی می‌باشد. گرانروی طبق تعریف به عمل اصطکاک درون سیال و در نتیجه، مقاومت سیال در برابر جریان گفته می‌شود و معیار اندازه‌گیری شدت جریان است (Razavi, 2006).

دانستن گرانروی سیال امری ضروری برای کنترل شدت جریان، طراحی و انتخاب مناسب‌ترین تجهیزات، پمپ‌ها، مبدل‌های حرارتی و دستگاه‌های بسته‌بندی است (Shahiri *et al.*, 2008).

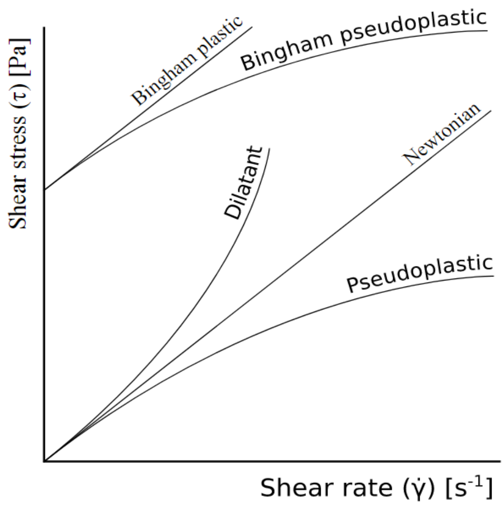
به‌طور معمول گرانروی به‌وسیله دستگاه‌های لزجت‌سنج که به‌طور مستقیم و حسی در تماس با سیال است اندازه‌گیری می‌شود. روش‌های سنتی ارزیابی حسی در تعیین خصوصیات مواد کاربرد زیادی دارند. ولی این روش‌ها زمان‌بر و پرهزینه و تحت تأثیر عوامل انسانی و در مواردی نیازمند تنظیم مجدد است. این عوامل سبب ایجاد انگیزه برای توسعه روش‌های جانشین است که در زمان کمتر و با دقت بیشتر خصوصیات محصول را تعیین کند. پردازش تصویر یکی از این روش‌ها است (Kvaal *et al.*, 1998).

بعضی از مایعات و مواد بیولوژیکی نیمه‌جامد دارای رفتار

۱- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز
۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز
(*- نویسنده مسئول: Email: ajafari@shirazu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v8i2.61681

غیرنیوتنی هستند، یعنی رابطه بین تنش برشی و نرخ برشی آنها خطی نیست. چنین سیالاتی را اصطلاحاً غیرنیوتنی می‌نامند. محلول‌های غلیظ ماکرومولکول‌ها (نشاسته‌ها، پروتئین‌ها و صمغ‌ها) و مواد کلوئیدی نظیر امولسیون‌ها، خمیرها و سوسپانسیون‌ها مثال‌هایی از سیالات غیرنیوتنی در صنایع غذایی هستند.

رفتار سیالات غیرنیوتنی به علت تغییر در گرانروی آنها که وابسته به شرایط کار است، مشکل می‌باشد. گرانروی اندازه‌گیری شده تحت شرایط خاص (در یک زمان) را گرانروی ظاهری (η_a) می‌نامند. گرانروی ظاهری برای سیالات غیرنیوتنی همانند سیالات نیوتنی برابر نسبت تنش برشی به نرخ برش می‌باشد، با این تفاوت که گرانروی سیالات غیرنیوتنی تابعی از نرخ برش بوده و برخلاف گرانروی سیالات نیوتنی، تحت شرایط مختلف نرخ برش ثابت نیست. سیالات غیرنیوتنی به دو گروه بزرگ سیالات وابسته به زمان و سیالات مستقل از زمان تقسیم‌بندی می‌شوند (Razavi *et al*., 2007). رئوگرام انواع سیالات مستقل از زمان در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- ویژگی جریان سیالات متعارف

Fig.1. Flow characteristics of certain fluids (Wilhelm *et al*., 2004)

اندازه‌گیری دانسیته و گرانروی به‌طور هم‌زمان نیز میسر است. به این منظور، دستگاهی که شامل چند سوزن، یک استوانه‌ای عمودی، مبدل‌های اندازه‌گیر زمان بود توسط Park و همکاران (۱۹۹۷) طراحی شد. روش کار دستگاه به این ترتیب می‌باشد که چند سوزن با دانسیته‌های مشخص به درون سیال رها می‌شوند و مدت زمانی که سوزن‌ها فاصله مشخصی را درون سیال طی می‌کردند توسط مبدل‌ها اندازه‌گیری شده و سپس سرعت سوزن‌ها مشخص می‌شدند. با توجه به مشخص بودن سرعت و دانسیته سوزن‌ها مقدار گرانروی و دانسیته سیال با استفاده از معادله استوکس تعیین می‌شد. با این دستگاه گرانروی و دانسیته را برای سیالات نیوتنی را با دو سوزن و برای سیالات غیرنیوتنی با سه سوزن می‌توان تعیین کرد.

با استفاده از روش تشخیص جرم لزجت‌سنج لوله مویینه‌ای جدیدی توسط Shin و همکاران (۲۰۱۱) طراحی شد که می‌توانست گرانروی هر دو نوع سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی را در محدوده بزرگی از نرخ برش تعیین کند. در این لزجت‌سنج برخلاف لزجت‌سنج‌های معمول اندازه‌گیری تغییرات جرم سیال نسبت به زمان جایگزین اندازه‌گیری دبی و افت فشار شد. با یک ترازوی دقیق می‌توان تغییرات جرم سیال جمع شده در ظرف را اندازه گرفت و از آن برای محاسبه ریاضی گرانروی و نرخ برش استفاده کرد. برای امکان‌سنجی و بررسی دقت روش تشخیص جرم سیال آب و یک سیال غیرنیوتنی مورد آزمایش قرار گرفتند و نتایج آنها با یک لزجت‌سنج چرخشی مقایسه شد. نتایج روش تشخیص جرم مطابقت بسیار خوبی با نتایج لزجت‌سنج چرخشی داشت. از مزایای این لزجت‌سنج سادگی، هزینه پایین، توانایی اندازه‌گیری گرانروی در محدوده نسبتاً وسیع نرخ برش است.

گرانروی شیره خرما در حین فرآوری و عمل تغلیظ افزایش می‌یابد و لذا با اندازه‌گیری گرانروی شیره خرما به‌صورت پیوسته می‌توان تعیین کرد که آیا محصول نهایی به غلظت مورد نظر رسیده است یا نه. گرانروی، طبق تعریف، به عمل اصطکاک درون سیال و در نتیجه مقاومت سیال در برابر جریان گفته می‌شود. وقتی گرانروی سیال افزایش می‌یابد نیروهای اصطکاکی نیز افزایش می‌یابند و انرژی بیشتری مورد نیاز خواهد بود.

جهت بررسی رفتار رئولوژیکی مخلوط خمیر کنجد کم‌چرب و شیره خرما، از لزجت‌سنج چرخشی بروکفیلد استفاده شده است که در آن تأثیر جایگزین کردن چربی با صمغ گوار، زانتان و نشاسته در ۳ سطح و دماهای ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد بررسی شده است. همه مخلوط‌های خمیرکنجد و شیره خرما رفتار شبه‌پلاستیکی غیرنیوتنی در همه دماها و سطوح چربی جایگزین شده نشان دادند (Razavi *et al.*, 2007).

نوعی لزجت‌سنج با استفاده از اندازه‌گیری نیروی اعمال شده توسط جریان آرام سیال درون یک مجرای کوچک توسط نوئل و همکاران (Noel *et al.*, 2011) طراحی شد. نیرو توسط یک حسگر استوانه‌ای بلند که در مسیر جریان سیال غوطه‌ور بود اندازه‌گیری می‌شد. این لزجت‌سنج برای چندین سیال نیوتنی و غیرنیوتنی مورد آزمایش قرار گرفت. برای سیالات نیوتنی که محدوده گرانروی آنها (۰/۰۰۱–۰/۰۱ *Pa.s*) بود جواب دستگاه به‌صورت خطی و با مقادیری که از رئومترهای تجاری به‌دست آمد ۹۰٪ مطابقت داشت و برای سیالات غیرنیوتنی، با توجه به تغییرات نیرو با تغییرات سرعت جریان امکان تعیین گرانروی وابسته به نرخ برش را فراهم می‌کرد.

اغلب وسایل اندازه‌گیری گرانروی بر اساس تعریف فیزیکی و رابطه اولیه گرانروی طراحی شده‌اند و با اعمال تنش برشی به سیال و اندازه‌گیری تغییرات سرعت، گرانروی را تعیین می‌کنند. اما گرانروی می‌تواند از دید دیگری نیز مورد بررسی قرار گیرد و آن نحوه تغییر شکل و جریان سیال در برابر نیرو است. بر اساس این ویژگی که یک ویژگی ظاهری سیال است می‌توان گرانروی را تعیین کرد.

روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری گرانروی بر پایه اندازه‌گیری پارامترهایی استوار است که رابطه قابل تبیینی با گرانروی داشته باشند. به‌عنوان مثال گرانروی مایع درون سلولی با میزان تابش فلورسنت در طول موج ۶۰۰ نانومتر رابطه مستقیمی نشان می‌دهد و لذا این پدیده می‌تواند به‌عنوان شاخصی جهت اندازه‌گیری گرانروی مایع درون سلولی مورد استفاده قرار گیرد (Wang *et al.*, 2016).

از آنجا که گرانروی سیال موجب کندی حرکت اجسام در حال حرکت درون سیال می‌شود و با توجه به پایدار بودن این رابطه، می‌توان از حرکت یک جسم غوطه‌ور در سیال نیز به‌طور غیرمستقیم میزان گرانروی را اندازه‌گیری نمود (Kheloufi *et al.*, 2015) و یا با رها کردن یک گوی شیشه‌ای درون مایع و تصویربرداری با سرعت زیاد از باز پرش قطره مایع به سمت بالا می‌توان گرانروی مایه را اندازه‌گیری کرد (Jung *et al.*, 2015).

اهمیت کاربرد چنین روش‌های غیرمستقیمی هنگامی مشخص می‌شود که با ابزارهای متداول نتوان گرانروی را اندازه‌گیری نمود. به‌عنوان مثال اندازه‌گیری گرانروی آهن مذاب با استفاده از روش گوی در حال سقوط با به‌کارگیری رادیوگرافی اشعه ایکس میسر می‌باشد. بدین ترتیب که با استفاده از تصویربرداری با سرعت زیاد و ثبت موقعیت لحظه‌ای گوی در سیال می‌توان بر اساس روابط فیزیکی موجود، سرعت حد گوی و نهایتاً گرانروی سیال را محاسبه نمود (Kono *et al*. 2015).

گاهی حجم نمونه‌ها به‌حدی کم است که با ابزارهای متداول نمی‌توان گرانروی را اندازه‌گیری کرد. اندازه‌گیری گرانروی خون، یکی از این موارد است. در پژوهشی در همین راستا، یک آشکارساز بسیار ریز با کمک روش پردازش تصویر به‌کار گرفته شد و نشان داد که این روش، دقت خوبی در اندازه‌گیری گرانروی نمونه خون به‌دست می‌دهد (Kim *et al.*, 2017).

نحوه گسترش سیال بر روی یک سطح افقی نیز می‌تواند به‌عنوان معیاری جهت تعیین گرانروی سیال مورد استفاده قرار گیرد (Nassiri *et al*, 2013). بررسی‌ها نشان داده که تغییرات سطح نسبت به زمان از یک رابطه خطی با ضریب همبستگی بسیار قوی (با میانگین خطای نسبی ۷/۳ درصد) پیروی می‌کند و این رابطه تابع گرانروی مایع است. تجزیه و تحلیل داده‌ها بیانگر قابل استفاده بودن نرخ تغییرات مساحت سطح برای تعیین رابطه کالیبراسیون دستگاه بود. بنابراین رابطه بین گرانروی ظاهری و نرخ تغییرات سطح مایع بررسی شد و نشان داد که یک رابطه نمایی با ضریب تبیین ۰/۹۸۸ قادر است گرانروی ظاهری را با میانگین خطای نسبی ۱/۱ درصد تخمین بزند. هرچند این روش به دلیل ریزش مایع بر روی یک سطح و اندازه‌گیری تغییرات سطح، امکان اندازه‌گیری بلادرنگ و پایش مداوم گرانروی را ایجاد نمی‌کند.

در پژوهش‌هایی که تاکنون در مورد استفاده از پردازش تصاویر در تعیین گرانروی انجام شده است همچنان نیاز است تا از مایع مورد مطالعه نمونه‌برداری شود و به همین دلیل امکان اندازه‌گیری بلادرنگ مایع را فراهم نمی‌کنند. لذا هدف از این پژوهش، بررسی روابط بین ویژگی‌هایی از تصاویر است که از جریان شیره خرما در حال ریزش استخراج شده و در صورت تطابق با رفتار رئولوژیکی شیره خرما بتوان از آنها برای تخمین گرانروی استفاده نمود. علاوه بر این، عملکرد شبکه عصبی در مدل‌سازی و تعیین پارامترهای رئولوژیکی شیره خرما نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

شیره خرما استفاده شده به‌عنوان سیال مورد آزمایش از شرکت خرما بن جنوب تهیه شد. لوازم و تجهیزات استفاده شده در این تحقیق عبارت بودند از: دستگاه لزجت‌سنج بروکفیلد (LVDV-II+PRO، آمریکا)، دستگاه حمام آب (WNB 22 ،Memmert، آلمان)، دوربین دیجیتال (Canon IXUS 960IS ،CDD با وضوح ۱۲ مگاپیکسل)، ترموستات (SU-105IP ،SAMWON ENG، کره جنوبی)، رفراکتومتر (ATAGO، ژاپن) و المنت‌های حرارتی با توان ۳۰۰ وات.

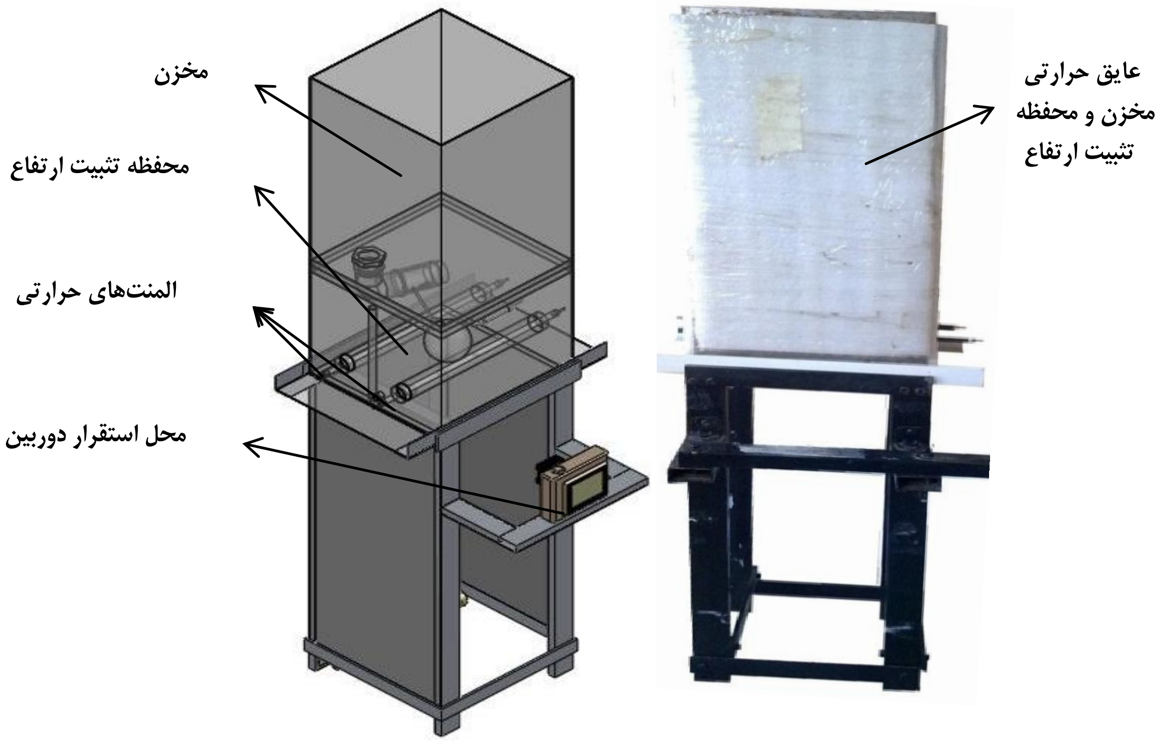
برای اندازه‌گیری گرانروی شیره خرما از دستگاه لزجت‌سنج موجود در بخش مهندسی شیمی دانشگاه شیراز استفاده شد. با توجه به محدوده گرانروی مورد نظر در این آزمایشات از اسپیندل استوانه‌ای دستگاه لزجت‌سنج استفاده شد. نمایشگر این دستگاه، مقدار گرانروی و گشتاور مورد نیاز برای ثابت نگه‌داشتن سرعت دورانی را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری گرانروی مطابق روش ارائه شده توسط شرکت سازنده، مقدار نیم لیتر شیره خرما درون یک بشر ریخته و زیر دستگاه لزجت‌سنج و درون حمام آب قرار داده شد. شیره خرما به مدت ۳۰ دقیقه در دمای مورد نظر گرم شد تا دمای همه نقاط شیره خرما و همچنین اسپیندل هم‌دما و متعادل گشت. سپس دستگاه لزجت‌سنج در سرعت دورانی مورد نظر شروع به‌کار کرد. قرائت مقدار گرانروی بعد از مدتی که مقادیر گرانروی به حالت تعادل رسید و تغییری در آنها مشاهده نشد انجام گرفت و مقادیر تنش برشی و نرخ برش محاسبه شدند. در بعضی از سیالات از جمله شیره خرما، رابطه بین تنش برشی و نرخ برش در یک مختصات لگاریتمی- لگاریتمی به‌صورت خطی است:

$$\log \tau = \log k + n \log\left(\frac{dv}{dy}\right) \qquad (۱)$$

که در آن k شاخص قوام سیال (Ns^nm^{-2}) و n شاخص قانون توان یا رفتار جریان (بدون بعد) می‌باشد. بنابراین برای به‌دست آوردن مقادیر شاخص قوام و شاخص رفتار جریان باید داده‌های تنش برشی و نرخ برش در یک مقیاس لگاریتمی و یا لگاریتم داده‌های تنش و کرنش در یک مختصات معمولی ترسیم گردد. در این حالت لگاریتم شاخص رفتار جریان، شیب خط و لگاریتم شاخص قوام، عرض از مبدأ خواهد بود.

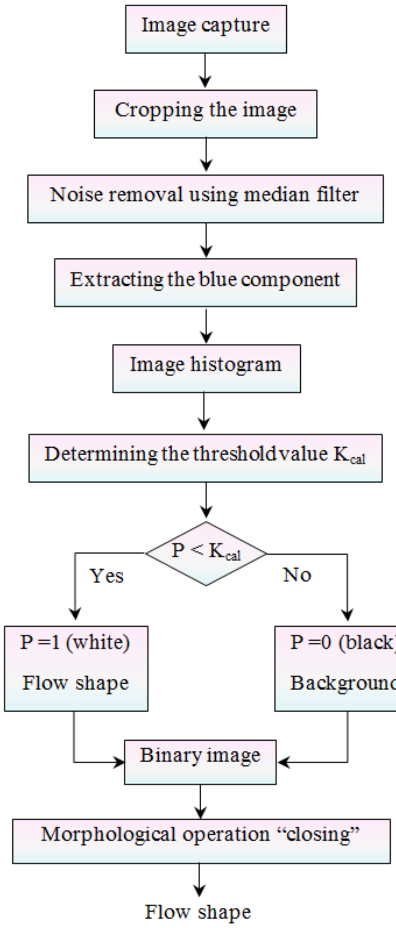
بنابراین با به‌دست آوردن مقادیر n و k می‌توان گرانروی سیالی را که از قانون توان تبعیت می‌کند، در دامنه مشخصی از تنش برشی و نرخ برش محاسبه کرد و به‌راحتی می‌توان مشخص نمود که سیال نیوتنی یا غیرنیوتنی است (Razavi, 2006).

جهت تهیه تصاویر لازم برای بخش پردازش تصاویر این تحقیق از شکل ریزش شیره خرما در غلظت‌های مختلف ۶ محدوده ۲۰ تا ۷۰ درجه بریکس و ۵ دما از ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد عکس‌برداری شد. بدین منظور مجموعه لوازم شامل دو بخش کلی مخزن و پایه عکس‌برداری طراحی و ساخته شد (شکل ۲). به‌منظور جلوگیری از تبادل حرارتی شیره خرما با محیط و در نتیجه تغییرات گرانروی ناخواسته، اطراف کل مخزن، عایق‌کاری حرارتی شد.



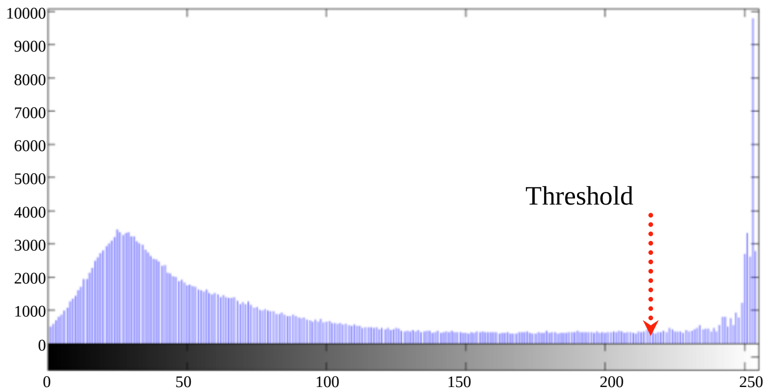
شکل ۲- شکل اصلی و طرح اجزای داخلی دستگاه تعیین گرانروی

Fig.2. The origional view and the drawing of the internal components of the viscosity measurement setup



شکل ۳– مراحل آماده‌سازی و قطعه‌بندی تصویر

Fig.3. Image preparation and segmentation procedure



شکل ٤– هیستوگرام مولفه آبی تصویر گرفته شده از جریان مایع

Fig. 4. The blue component histogram of the image taken from the fluid flow

از آنجا که خروج مایع از روزنه و شکل جریان خروجی تابع فشار استاتیکی در لحظه خروج از روزنه می‌باشد و تغییرات ارتفاع ستون مایع موجب تغییر دبی خروجی و تغییر شکل جریان می‌شد لذا ارتفاع مایع ثابت نگه داشته شد تا تغییرات جریان تنها در اثر تغییرات گرانروی بوده و وابسته به فشار مایع نباشند. به همین دلیل یک محفظه واسط میان مخزن مایع و روزنه خروجی در نظر گرفته شد که

توسط یک مکانیزم شناور، سطح مایع را دائماً ثابت نگه می‌داشت. محفظه تثبیت تا ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر از شیره خرما پر می‌شد. به‌منظور عکس‌برداری در دماهای مختلف در این قسمت دو المنت حرارتی و ترموستات برای گرم کردن و کنترل دمای شیره استفاده شد.

پردازش تصویر

فلوچارت مراحل مختلف آماده‌سازی و قطعه‌بندی تصاویر در شکل ۳ آورده شده است. پس از دریافت تصاویر توسط دوربین، قسمت ریزش مایع از تصویر برش[1] داده شد. سپس با استفاده از فیلتر میانه[2] نویزهای به‌وجود آمده در اثر نورپردازی حذف شد این بهینه‌سازی و فیلتر باعث شد که انواع نویزهای موجود در تصویر تا حد قابل قبولی حذف شوند و تصویر شفاف‌تری در اختیار قرار گیرد. مولفه رنگ آبی (B) از تصویر استخراج گردید و با آستانه‌گذاری بر روی آن، تصویر باینری حاصل شد که نشان‌دهنده مایع در حال ریزش با مقادیر ۱ و زمینه با مقادیر صفر بود. پس از این مرحله مقدار حد آستانه برای جدا کردن شکل مورد نظر از زمینه و تبدیل تصویر به حالت سیاه و سفید تعیین شد. مقدار حد آستانه از روی نمودار هیستوگرام رنگ آبی (شکل ۴) تعیین گردید.

استخراج ویژگی‌ها از تصاویر

با توجه به ماهیت گرانروی، تنها اندازه‌گیری ویژگی شکل کافی بود بدین منظور برنامه‌ای طراحی شد که در ارتفاع‌های مشخصی از شکل، فاصله عرضی تصویر سیاه و سفید را محاسبه نماید.

ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر عبارت بودند از عرض مقطع ریزش مایع (W) در ارتفاع‌های مختلف ریزش از روزنه ته مخزن مایع (شکل ۵).

در مجموع ده عرض مقطع ریزش (W_1 تا W_{10}) به‌عنوان ویژگی در نظر گرفته شد که با تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA[3]) تعدادی از ویژگی‌ها حذف گردیدند. تعداد ویژگی‌های باقی مانده بستگی به شدت اعمال PCA دارد. در اینجا با حذف داده‌هایی که نقشی کمتر از ۲٪ در ایجاد واریانس کل را داشتند تعداد داده‌های مؤثر و متعامد به سه ویژگی که سه عرض اول ریزش بودند کاهش یافت.

استفاده از شبکه عصبی جهت پیش‌بینی شاخص رفتار جریان و شاخص قوام

در این تحقیق از شبکه عصبی چند لایه با روش تعلیم پس‌انتشار خطا به‌منظور پیش‌بینی دو مقدار شاخص رفتار جریان و شاخص قوام بر اساس ویژگی‌های استخراج شده از تصویر استفاده شد (شکل ۶). با توجه به اشکال روزنه‌ها و ابعاد آنها شش شبکه عصبی تشکیل گردید. داده‌های استخراج شده از تصاویر پس از ماتریس ورودی به شبکه عصبی شامل داده‌های استخراج شده از تصاویر (سه عرض مقطع مؤثر باقی‌مانده پس از اعمال PCA)، ویژگی‌های غلظت، دما و ماتریس خروجی دو مقدار شاخص رفتار جریان و شاخص قوام بودند.

با توجه به این که عکس‌برداری از شکل ریزش در شش سطح غلظت و پنج سطح دما انجام گرفت، بنابراین شبکه از ۳۰ سری داده که هر سری شامل ویژگی‌های ذکر شده بودند، تشکیل شدند.

نتایج و بحث

نتایج آزمایشات انجام شده بر روی تغییرات گرانروی شیره خرما نشان داد که شیره خرما در غلظت‌ها و دماهای مختلف رفتارهای کاملاً متفاوتی از خود نشان می‌دهد و رفتار این ماده می‌تواند بازه وسیعی از رفتارهای سودوپلاستیک، نیوتنی تا دیلاتنت را شامل شود. با بررسی لگاریتم تغییرات تنش برشی در برابر لگاریتم نرخ برش، مشخص شد که می‌توان شاخص‌های جریان و شاخص قوام را از این داده‌ها به‌دست آورد. شکل ۷ یک نمونه از این روابط بین لگاریتم تنش برشی و نرخ برش را در غلظت ۴۰ درجه بریکس نشان می‌دهد. غلظت با گرانروی رابطه‌ای مستقیم و غیرخطی دارد و با افزایش غلظت گرانروی افزایش می‌یابد. در شکل ۷ رابطه معکوس و غیرخطی گرانروی و دما نیز مشهود است به‌طوری که با افزایش دما، گرانروی کاهش می‌یابد.

با توجه به مطالب بالا مقادیر n و k برای شیره خرما در غلظت‌ها و دماهای مختلف محاسبه شد.

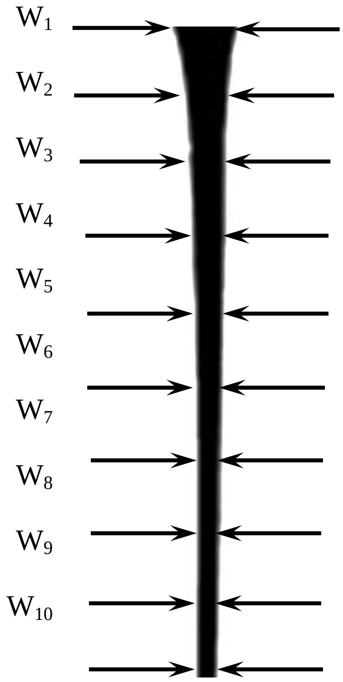
جدول ۱ مقادیر شاخص جریان و شاخص قوام را به ازای غلظت‌های مختلف در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر n به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که در غلظت‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه بریکس شیره رفتار غیرنیوتنی از نوع دیلاتانت از خود نشان می‌دهد و در غلظت ۵۰ درجه بریکس شیره به‌طور تقریبی دارای رفتار نیوتنی و در غلظت‌های ۶۰ و ۷۰ درجه بریکس دارای رفتار غیرنیوتنی از نوع سودوپلاستیک است.

شبکه عصبی پیش‌بینی شاخص رفتار جریان و شاخص قوام

با توجه به نتایج به‌دست آمده از بخش‌های قبل مشاهده گردید که شیره خرما در غلظت‌ها و دماهای مختلف رفتار غیرنیوتنی از خود نشان داد. در سیالات غیرنیوتنی مقدار گرانروی باید به همراه نرخ برش بیان شود و در نتیجه امکان بیان یک مقدار ثابت گرانروی به

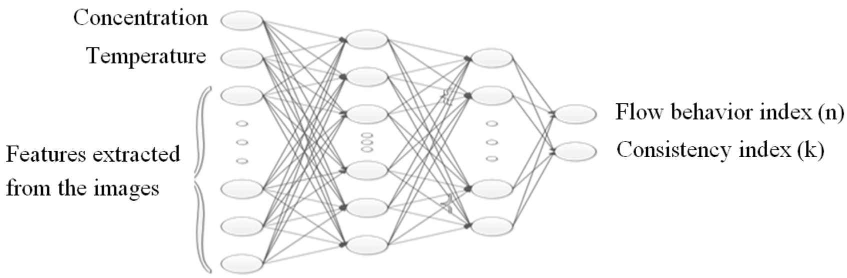
1- Crop
2- Median filter
3- Principal component analysis

ازای دما و غلظت مشخص برای یک سیال غیرنیوتنی وجود نـدارد. از این رو برای سیالات غیرنیوتنی دو مقدار n و k با کمک شـبکه‌هـای عصبی با لحاظ کردن ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر پیش‌بینـی شدند.



شکل ۵- عرض مقطع مایع در حال ریزش به‌عنوان ویژگی استخراج شده از تصویر

Fig. 5. Cross section width of the falling flow as the extracted feature from the image



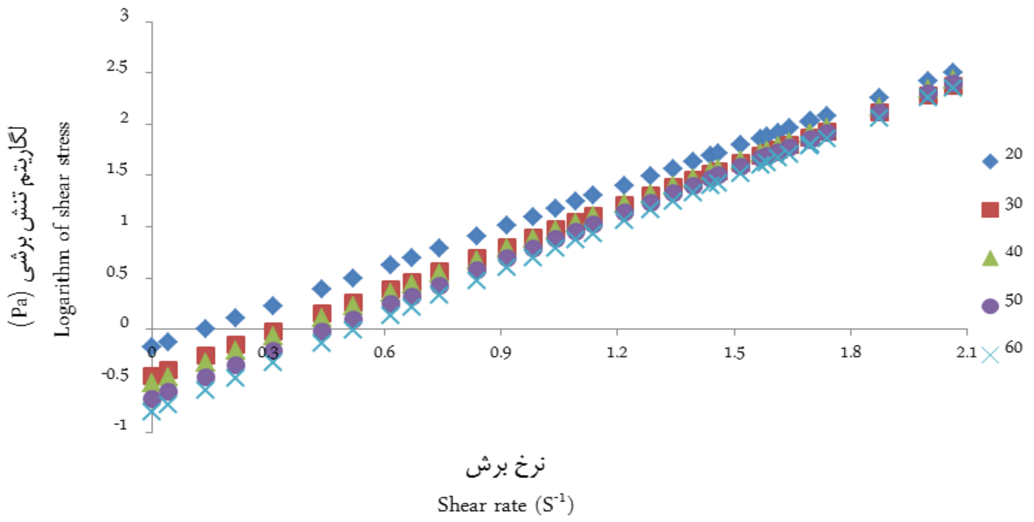
شکل ٦- طرحواره شبکه عصبی برای تخمین مقادیر n و k

Fig.6. Schematic of neural network for estimation of n and k values

جدول ۱- شاخص جریان سیال و شاخص قوام در غلظت‌های مختلف

Table 1- Fluid flow behavior index and consistency index at different concentration levels

$K(Pa.s^n)$	n	دما Temperature (^oC)	غلظت (درجه بریکس) Concentration (degree brix)
0.12	1.48	30	20
0.13	1.55	30	30
0.44	1.36	30	40
3.22	0.96	30	50
30.15	0.7	30	60
157.85	0.51	30	70



شکل ۷- تغییرات گرانروی نسبت به نرخ برش در غلظت ۴۰ درجه بریکس

Fig.7. Viscosity variations versus shear rate at 40 degrees brix concentration

جهت طراحی شبکه‌های عصبی از جعبه ابزار شبکه‌های عصبی نرم‌افزار متلب نسخه ۷/۱۱ استفاده شد. تعیین تعداد لایه‌ها و این که در هر لایه چند نرون باشد مساله پیچیده‌ای است که معمولاً به روش آزمون و خطا شبکه‌ای بهینه طراحی می‌شود و در نهایت شبکه‌های با دو لایه پنهان که در آنها از تابع‌های انتقال تانژانت سیگموئید و تابع فعالیت خروجی از نوع خطی بود، استفاده شد. برای آموزش شبکه ابتدا داده‌ها به‌صورت تصادفی توسط نرم‌افزار شبکه عصبی به سه قسمت تقسیم شدند، به‌طوری که ۷۰٪ داده برای آموزش، ۱۵٪ برای اعتبارسنجی و ۱۵٪ برای آزمون شبکه استفاده شد.

تعداد نرون‌های لایه پنهان به تدریج از ۲ نرون تا ۲۰ نرون افزایش داده شد. با افزایش تدریجی تعداد نرون‌ها در هر لایه و نیز افزایش تعداد لایه‌های پنهان، می‌توان قابلیت انعطاف شبکه جهت تطبیق با داده‌ها را افزایش داد. لذا همین روند افزایش برای شبکه دو لایه نیز تکرار شد. هریک از شبکه‌ها سه بار (با مقادیر اولیه وزن و بایاس جدید) آموزش داده شدند و بهترین نتیجه برای هر شبکه ثبت گردید.

جهت انتخاب بهترین شبکه مقادیر میانگین مربعات خطا در هر شبکه ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت که از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Y_{ANN,i} - Y_{m,i})^2 \qquad (۲)$$

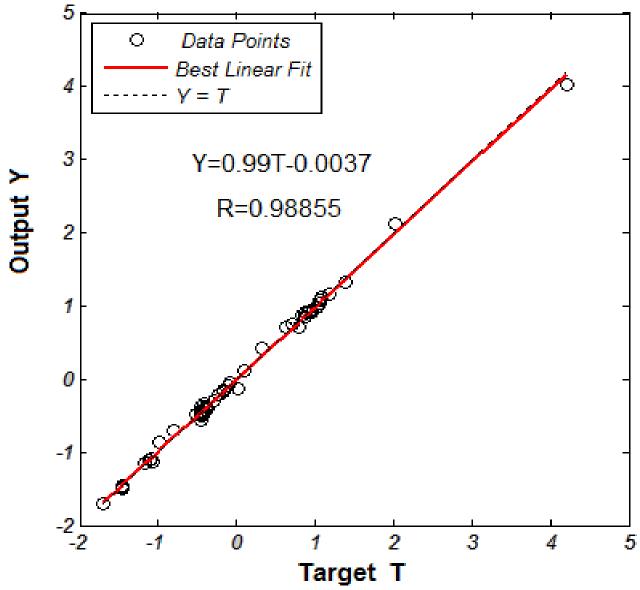
که N برابر تعداد نمونه‌ها، $Y_{ANN,i}$ خروجی شبکه عصبی برای نمونه iام و $Y_{m,i}$ نمایانگر مقدار اندازه‌گیری شده واقعی برای نمونه شماره iام می‌باشد و در نهایت شبکه دارای کمترین مقدار میانگین مربعات خطا و بهترین ضریب همبستگی به‌عنوان شبکه مناسب انتخاب گردید (Cubillos *et al.*, 2003). در شکل ۸ نتیجه تطابق داده‌های حاصل از مدل با مقادیر واقعی نشان داده شده است.

در جدول ۲ نتایج اعتبارسنجی ضربدری ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود از سه شبکه‌ای که برای هر شکل به‌وجود آمده بودند تنها شبکه‌ای که بهترین میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی را داشت به‌عنوان شبکه نهایی برای پیش‌بینی n و k انتخاب شده‌اند.

جدول ۲- شبکه‌های عصبی نهایی بعد از اعتبارسنجی ضربدری

Table 2- Final neural networks after cross validation

ضریب همبستگی coefficient of corrolation	میانگین خطای ارزیابی mean validation error	توپولوژی Topology	ابعاد روزنه Orifice Dimension (mm)	شکل روزنه Orifice shape
0.9728	0.0168	8-7-4-2	6	دایره‌ای Circular
0.9885	0.0138	9-4-2-2	12	
0.9774	0.0159	8-2-4-2	24	
0.9678	0.0179	10-6-4-2	2×14	مستطیلی Rectangular
0.9768	0.0161	9-3-3-2	4×28	
0.9563	0.0198	7-2-4-2	8×6	



شکل ۸- تطابق داده‌های واقعی و مدل تعیین گرانروی

Fig. 8. Matching the actual data and viscosity determination model

با توجه به مقادیر میانگین مربعات خطا و ضرایب همبستگی روزنه دایره‌ای با قطر ۱۲ میلی‌متر بهترین کارآئی را نسبت به دیگر شکل روزنه‌ها دارد و همچنین با توجه به جدول ۲ می‌توان گفت که روزنه‌ها با شکل دایره‌ای نسبت به شکل مستطیلی کارآمدتر بودند.

نتیجه‌گیری

ایجاد دماها و غلظت‌های مختلف شیره خرما نشان داد که رفتار شیره خرما می‌تواند بازه وسیعی از سیالات سودوپلاستیک، نیوتنی و دیلاتنت را شامل شود. بررسی‌های انجام شده نشان داد که شیره خرما در غلظت‌های پایین رفتار دیلاتنت از خود نشان می‌دهد و با افزایش غلظت، به یک سیال نیوتنی تبدیل شده و پس از آن در غلظت‌های بالاتر تبدیل به یک سیال سودوپلاستیک می‌شود. همچنین افزایش دما در تمام سطوح غلظت باعث کاهش میزان گرانروی می‌شود. بنابراین با توجه به رفتارهای متفاوت سیال، گرانروی می‌بایست بر اساس شاخص‌های رفتار جریان و قوام تعیین می‌شد. لذا ویژگی‌های مستخرج از تصاویر جهت تعیین شاخص‌های مذکور به‌کار گرفته شدند. عملکرد و دقت بالای شبکه‌های عصبی مصنوعی در تعیین شاخص‌های جریان و قوام بر اساس ویژگی‌های مستخرج از تصاویر حاکی از این است که ویژگی‌های مذکور می‌توانند به‌عنوان یک الگوی تعیین‌کننده گرانروی سیال مورد استفاده قرار گیرند.

References

1. Cubillos, F., and A. Reyes. 2003. Design of a model based on a modular neural network approach. Drying Thechnology 21 (7): 1185-1195.
2. Jung, W., C. Hurth, A. E. Becker, and F. Zenhausern. 2015. Real-time monitoring of viscosity changes triggered by chemical reactions using a high-speed imaging method. Sensing and Bio-Sensing Research 5: 8-12.
3. Kim, S., K. C. Kim, and E. Yeom. 2017. Microfluidic method for measuring viscosity using images from smartphone. Optics and Lasers in Engineering 95: 1-7.
4. Kheloufi, N., and M. Lounis. 2015. Viscosity measurement using optical tracking of free fall in Newtonian fluid. Acta Physica Polonica 128: 123-127.
5. Kono, Y., C. Kenney-Benson, Y. Shibazaki, C. Park, G. Shen, and Y. Wang. 2015. High-pressure viscosity of liquid Fe and FeS revisited by falling sphere viscometry using ultrafast X-ray imaging. Physics of the Earth and Planetary Interiors 241: 57-64.
6. Kvaal, K., J. P. Wold, U. J. Indahl, P. Baardseth, and T. Naes. 1998. Multivariate feature extraction from

textural images of bread. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 42: 141-158.
7. Nassiri, S. M., A. Bakhshipour, M. M. Heydari, and M. Barzegar. 2013. Estimation of apparent viscosity of non- Newtonian fluids using machine vision. The 8th National Congress on Agricultural Engineering (Biosystem) and Mechanization. Mashhad, Iran. (In Farsi).
8. Noel, M. H., B. Semin, J. P. Hulin, and H. Auradou. 2011. Viscometer using drag force measurements. Review of Scientific Instruments 82 (2): 023909.
9. Park, N. A., F. Thomas, and Jr. Irvine. 1997. Liquid density measurements using the falling needle viscometer. International Communications in Heat and Mass Transfer 24 (3): 303-312.
10. Razavi, M. A. 2006. Biophysical Properties of Agricultural Products and Food Materials. Ferdowsi University of Mashhad Publication, Mashhad. (In Farsi).
11. Razavi, S. M. A., M. B. Habibi Najafi, and Z. Alaee. 2007. The time independent rheological properties of low fat sesame paste/date syrup blends as a function of fat substitutes and temperature. Food Hydrocolloils 21: 198-202.
12. Sabati Gavgani, M. 2008. Investigation of the recycling status of valuable materials from agricultural wastes. Monthly Magazine of Agriculture and Food, 74. (In Farsi).
13. Shin, S., S. W. Lee, and D. Y. Keum. 2001. A new mass-detecting capillary viscometer. Review of Scientific Instruments 72 (7): 3127-3128.
14. Shahiri Tabarestani, H., Y. Maghsoodlou, A. Motamedzadegan, and A. Sadeghi Mahoonak. 2008. Prediction of viscosity variation of skin gelatin of rainbow trout (Onchorhynchus mykiss) at different preprocessing time by using artificial neural network. 18th National Congress on Food Science and Technology, Mashhad, Iran. (In Farsi).
15. Wang, X., F. Song, and X. Peng. 2016. A versatile fluorescent probe for imaging viscosity and hypochlorite in living cells. Dyes and Pigments 125: 89-94.
16. Wilhelm, L. R., D. A. Suter, and G. H. Brusewitz. 2004. Physical Properties of Food Materials. Chapter 2 in Food & Process Engineering Technology, 23-52. St. Joseph, Michigan: ASAE. American Society of Agricultural Engineers.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 8, No. 2, Fall - Winter 2018, p. 309-320

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۸، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۷، ص ۳۲۰-۳۰۹

Estimation of Date Syrup Viscosity using Machine Vision and Artificial Neural Network

A. Jafari[1*]- E. Tatar[2]

Received: 08-01-2017
Accepted: 02-12-2017

Introduction

Science of rheology has numerous applications in various fields of the food industry such as process assessment, acceptance of products and sales. Fluid behavior changes during processing due to an adverse change in the consistency and due to the combined operations such as mixing, heating, cooling, etc. In this regard, viscosity is an important factor for quality assessment in most of the materials. To measure the viscosity, Viscometer devices are used which are directly in contact with the material. Working with these devices is time consuming, costly, under the influence of human factors and in some cases periodic calibration is required.

Materials and Methods

Date syrup was used as a viscous material in this study because it industrially is produced. An apparatus including a reservoir with an outlet orifice at the bottom was made to provide free flow of the liquid. Two sets of circular and rectangular orifices with different dimensions were used to investigate the effect of the orifice characteristics on the shape of the flow. Firstly, date syrup viscosity was measured by a conventional viscometer at 5 temperature levels and 6 concentration levels and behavior of the syrup were studied. Free flow of date syrup was photographed in the aforementioned temperatures and concentrations. On the other hand extracted features from the images were used as inputs to the neural network to give outputs as a fluid flow behavior index and consistency index. Measurement data were divided to three sets including training, validation and test sets whereas 70% of the data were used for training the neural networks, 15% as the validation set and 15% for testing the networks.

Results and Discussion

Results showed that similar to most of the liquids, viscosity of date syrup decreases when temperature increases. The experiments also revealed that the date syrup behavior is expressible with power law and can be determined using power equation. Date syrup has different behavior at different concentration levels. It changes from a pseudoplastic liquid to a Newtonian and then a dilatant liquid when concentration increases. Flow behavior index and consistency index corresponding to all three behavior of the fluid were determined. Results showed that the neural networks were able to accurately estimate the behavior and consistency indices with coefficient of correlations up to 0.99. Networks with three hidden layers were completely suitable for the estimation of the indices. These results revealed that in spite of different behavior of the liquid ranged from pseudoplastic to dilatant, the method was still able to determine the apparent viscosity of the fluid. Although the circular orifices were more efficient in determination of the indices than the rectangular orifices, there was not a significant difference between the uses of circular or rectangular orifices as well as no significant different between the orifices with different dimensions. The correlation between the actual and estimated values for fluid flow behavior index and consistency index was 0.98 whereas the mean square error of the validation sets was about 0.0138 which showed the accuracy of the method.

Conclusions

In this study a new method of viscosity determination was proposed. Machine vision was employed to estimate the viscosity based on the visual characteristics of the fluid free flow. Date syrup as a liquid with different rheological behaviors was used to assess the performance of the method. The strong correlation

1- Associate professor of Biosystems Engineering, Shiraz University
2- MSc graduated of Biosystems Engineering, Shiraz University
(*- Corresponding Author Email: ajafari@shirazu.ac.ir)

between the extracted features and fluid flow behavior index as well as a consistency index proved the reliability and accuracy of the method for viscosity estimation.

Keywords: Digital image processing, Pattern recognition, Real time, Viscosity